

## МОДЕЛЮВАННЯ ОБМЕЖУВАЧІВ МАКСИМАЛЬНОГО ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН ДЛЯ АНАЛІЗУ СТІЙКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

© Коновал В., Козовий А., 2016

Розглянуто аспекти моделювання сучасних систем збудження синхронних машин для аналізу стійкості електроенергетичних систем. Наведено особливості математичної моделі обмежувача максимального збудження та здійснено перевірку його функціонування на прикладі реальних електростанцій.

*Ключові слова: стійкість електроенергетичних систем, система збудження синхронної машини, регулятор збудження, системний стабілізатор, обмежувач максимального збудження, математична модель, цифрова модель.*

This article surveys the modeling aspects of modern excitation systems for synchronous machines that is used to analyze power system stability. We presented peculiarities of over excitation limiter mathematical model and tested their performance for real power stations.

*Key words: power systems stability, synchronous machine excitation system, excitation regulator, system stabilizer, over excitation limiter, mathematical model, digital model.*

### Вступ

Для детальних досліджень стійкості електроенергетичних систем необхідно точно моделювати поведінку синхронних машин. Це вимагає докладного опису поведінки їх систем збудження [1] під час і великих (важких порушень), і малих збурень. Однак на практиці важко використовувати детальні математичні моделі і синхронних машин, і їх систем збудження у зв'язку з відсутністю детальної інформації про параметри і додаткові функції управління. Зазвичай, порядок математичної моделі нижчий у зв'язку з неможливістю врахування всіх контурів регулювання і неврахування залежності функціонування регуляторів від частоти енергосистеми (що характерно для старих систем збудження). Такі спрощені моделі дійсні для режимів, в яких відхилення частоти є в межах 5% від номінального значення. Їх не можна використовувати для дослідження режимів підсинхронних резонансів чи крутих коливань валів синхронних машин [2].

За останні роки в Україні відбувається доволі активна модернізація блоків на електричних станціях [3], що особливо проявляється в заміні старих систем збудження на нові, сучасні системи збудження провідних закордонних фірм-виробників АВВ (Швейцарія), АЕГ (Німеччина) тощо. Це вимагає кількісного та якісного оцінювання впливу процесу модернізації на роботу інших електростанцій зокрема та електроенергетичної системи України загалом [4, 5].

### Аналіз попередніх досліджень та публікацій

В останні роки у світі велика увага під час аналізу стійкості електроенергетичних систем приділяється точнішому моделюванню систем збудження синхронних машин, а саме, врахуванню роботи обмежувачів струму збудження (обмежувачів перезбудження і недозбудження, OEL і UEL відповідно). Важливість цього підтверджується і затвердженим міжнародним стандартом IEEE Std 421.5™-2005 [6]. Наприклад, обмежувачі перезбудження (OEL) протягом багатьох років використовують як частину систем збудження, проте, лише недавно їх почали використовувати в моделюванні динаміки енергосистем. Можливість лавини напруги в найважчих післяаварійних

режимах енергосистем підвищує важливість моделювання цих обмежувачів під час дослідження умов збереження стійкості системи, наслідком яких є робота машин за високих рівнів збудження протягом тривалого періоду, таких, як лавина напруги або секціонування системи під час аварії. Такі події, зазвичай, відбуваються протягом тривалого періоду часу, якщо порівнювати з моделюванням динамічної стійкості або стійкості системи за малих збурень.

Модель OEL для тривалих досліджень системи повинна представляти стабільну повільно змінну динаміку системи, пов'язану з поведінкою за сталого режиму, але не швидкі динамічні характеристики, які повинні бути розглянуті в процесі їх розробки та налаштування. Під час моделювання змінного часового кроку або квазістаціонарного режиму, в яких крок часу обчислення може бути збільшений від частки циклу до декількох секунд, диференціальні рівняння для швидкої динаміки можуть бути замінені алгебраїчними рівняннями. Робота OEL має важливе значення для моделювання довготривалих процесів, які супроводжуються перемиканням відгалужень РПН трансформаторів, перемиканням батарей конденсаторів і скиданням навантаження. У своїй найпростішій формі модель обмежувача може складатися з однієї константи, що представляє поріг струму збудження, і прапорця для попередження, що поріг було перевищено, тому результати моделювання після цього моменту часу можуть бути не дійсними.

### Постановка задачі

Для аналізу стійкості режимів роботи ЕЕС в енергосистемах, енергопостачальних компаніях, проектних організаціях України, Росії, Казахстану, Польщі широко використовується програмний комплекс «ДАКАР Елекс» [7–9]. Задачею дослідження є розробка математичної моделі обмежувача максимального збудження для врахування їх у моделях сучасних систем збудження синхронних машин, реалізація цифрових моделей та тестування цих моделей на реальних об'єктах ЕЕС. Це дасть змогу спеціалістам енергосистем, електричних станцій, проектних організацій проводити комплексне дослідження стійкості режимів енергоблоків, електростанцій та ЕЕС загалом.

### Виклад основного матеріалу

На рис. 1 наведена загальна функціональна блок-схема системи збудження синхронної машини з різними підсистемами. До цих систем можуть входити: перетворювач напруги на виводах і компенсатор навантаження, елементи регулювання збудження, збудник, і здебільшого стабілізатор енергосистеми (PSS). Також можна застосовувати додаткове релейне регулювання збудження.

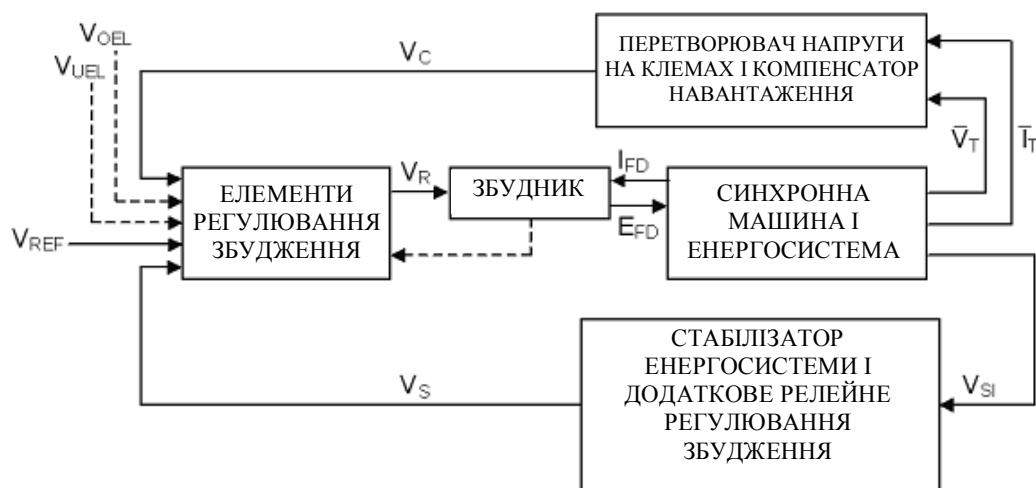


Рис. 1. Загальна функціональна блок-схема системи регулювання збудження синхронної машини

На рис. 1 прийнято такі позначення:  $V_{OEL}$  – вихідний сигнал обмежувача максимального збудження;  $V_{UEL}$  – вихідний сигнал обмежувача мінімального збудження;  $V_{REF}$  – еталонна напруга регулятора напруги (відповідає початковим умовам);  $V_C$  – вихідний сигнал блока перетворювача напруги на клеммах і компенсатора навантаження;  $V_R$  – вихідний сигнал регулятора збудження;  $V_S$  –

вихідний сигнал (комбінований) стабілізатора енергосистеми і пристрою додаткового релейного регулювання збудження;  $V_T$  – напруга на виводах синхронної машини;  $I_T$  – струм синхронної машини;  $V_{SI}$  – вхідний сигнал стабілізатора енергосистеми;  $I_{FD}$  – струм збудження синхронної машини;  $E_{FD}$  – напруга збудження синхронної машини.

### Обмежувачі перезбудження

Обмежувальна дія OELs повинна забезпечувати належний захист від перегрівання за високих рівнів струму збудження і одночасно дозволяти максимальне форсування збудження для збереження стійкості енергосистеми.

Робочі характеристики OEL зазвичай зводяться до потужності перезбудження неявнополусних синхронних машин, наведених в ANSI C50.13-1989 [10]. Стандарт встановлює допустимі рівні напруги збудження, а не струму збудження. Під час моделювання, зазвичай, задано постійний опір збудження, а напруга і струм збудження, у відсотках від номінальних значень, еквівалентні значенням з усталеного режиму. Граничний час перевантаження ротора визначається рівнянням (1), де  $A$ ,  $B$  і  $C$  – константи відповідно 33,75; 2 і 1, а струм збудження  $I_{FD}$  виражений у відсотках від номінального [10]. Цей взаємозв'язок наведений на рис. 2.

$$time = A / (I_{FD}^B - C) \quad (1)$$

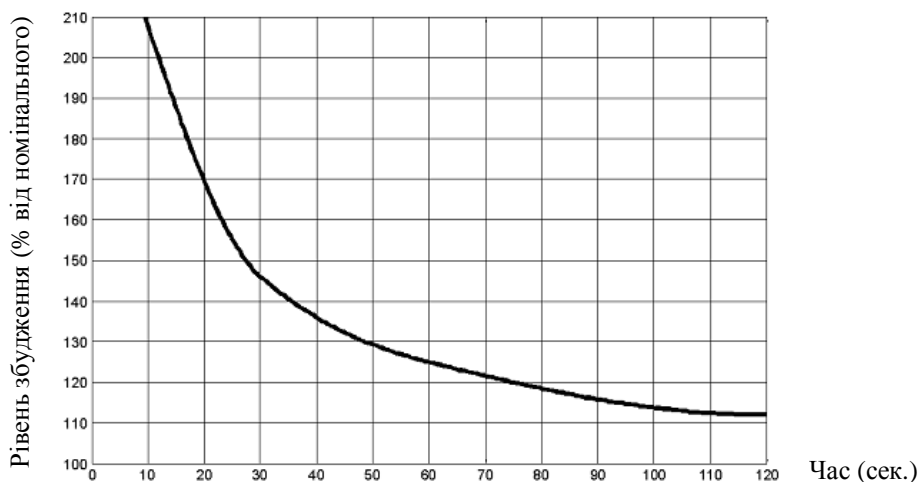


Рис. 2. Гранична характеристика допустимого перезбудження

Характеристики OEL також потрібно узгоджувати з іншими механізмами захисту від перезбудження, обмежувачами вольт/герц, обмежувачами напруги на клеммах та захисними пристроями [11].

Деякі OELs використовують функцію перекалібрування температури або тиску, при якій характеристики OEL змінюються залежно від температури або тиску охолоджувального газу генератора. Оскільки це зазвичай повільно діючий ефект, він не представлений в моделі OEL, і модель OEL повинна відображати граничні характеристики початкового робочого режиму.

#### Типи OEL

Обмежувальні пристрої, розроблені для того, щоб втримати струм збудження в межах потужності машини, бувають кількох видів, але всі працюють за однаковою послідовністю дій: виявлення перезбудження, дозволення йому тривати протягом визначеного часу (періоду) перевантаження, а потім зменшення збудження до безпечного рівня. Хоча в ідеалі для визначення стану перезбудження потрібно виміряти температуру обмотки збудження, обмежувачі, які використовуються сьогодні, вимірюють струм збудження, напругу збудження, чи струм або напругу поля збудження. Саме тому етап виявлення перезбудження в цих обмежувачах – це порівняння виміряного струму або напруги з уставкою спрацювання (реле). Дозволений період перезбудження може бути фіксованим або змінюватися обернено пропорційно до рівня збудження. Рівень збудження може бути зменшений

миттєвим зниженням заданої точки відліку, плавним зниженням заданої точки відліку, або передаванням управління від АРН до ручного управління нижчою заданою точкою напруги збудження.

Простий OEL має визначену точку спрацювання, визначений час затримки і миттєво знижує задану точку збудження до безпечного значення. Поширеніший тип обмежувача, представлений багатьма виробниками, поєднує характеристики миттєвого і зворотно-залежної затримки часу спрацювання, і перемикається з миттєвого обмежувача, налаштованого на 160 % номінального струму збудження, на часовий обмежувач, налаштований на 105 % номінального струму збудження. Задана точка струму збудження не знижується лінійно/поступово, а зменшується майже миттєво, коли перемикається цей тип обмежувача. У цьому типі обмежувача регулюється: крива обернено-залежної затримки часу, значення миттєвого обмежувача і значення часового обмежувача.

Інші виробники пропонують обмежувачі перезбудження, що лінійно знижують задану точку обмежувача від миттєвого значення до налаштувань часового обмежувача. Швидкість лінійної зміни може бути постійною [12] або пропорційною до рівня перезбудження [13].

Деякі, переважно старіші, системи збудження не мають постійно діючих обмежувачів перезбудження. Якщо збудження довго тримається на високій позначці, ці системи перемикаються з автоматичного регулювання напруги на визначену точку збудження. Визначену точку збудження можна встановити на подавання максимального постійного струму збудження, або встановити на нормальне положення коефіцієнта потужності, що дорівнює одиниці.

### Модель OEL

Наведена модель представляє важливі параметри OELs, необхідні для деяких великомасштабних досліджень системи. Це результат прагматичного підходу, спрямованого на отримання моделі, яку можна широко застосовувати з даними, які надають виробники генераторів. Спроба ввімкнути всі зміни функціональності OELs і точно відтворити їх взаємодію з рештою систем збудження, найшвидше, призведе до значного ускладнення моделі і буде неприйнятним для досліджень стійкості реальних енергосистем.

У реальних системах OEL можна контролювати і обмежувати одну з декількох змінних (основний струм або напругу збудження, струм або напругу поля збудження тощо). Хоч вибір цієї конструкції впливає на швидкі динамічні характеристики OEL, це неістотно за моделювання довготривалої реакції. Отже, зазвичай, за вхідний параметр достатньо брати основний струм збудження. Оскільки в більшості програм моделювання задано постійний опір збудження, в усталеному режимі значення  $E_{FD}$  (напруга збудження на виводах) і  $I_{FD}$  (струм збудження синхронної машини) будуть еквівалентні у в.о. [14]. У моделі передбачається, що вимірне/обмежене значення – це основний струм збудження  $I_{FD}$ , хоча також можна використовувати й  $E_{FD}$ . Системи, які обмежують поле збудження обертового збудника також можуть ґрунтуватись на відповідному рівні основного струму збудження.

На жаль, вибір напруги збудження генератора як обмеженої змінної вводить залежність від опору збудження, який може змінитися більше, ніж на 20 % за зміни температури від 25 до 75 °С. Гранична точка напруги збудження повинна відображати температуру обмотки збудження "в гарячому стані", або, якщо модель містить опір збудження, генератор повинен бути змодельований з більшим опором обмотки збудження, який підходить для умов збудження в гарячому стані.

Найшвидше за нормоване значення струму збудження у програмах моделювання приймають струм збудження на повітряному зазорі лінії кривої насичення машини за номінальної напруги на клеммах. Оскільки налаштування OEL зазвичай ґрунтуються на струмі збудження в номінальних МВА, струм збудження повинен бути перетворений у базове значення  $I_{Rated}$  (номінального струму збудження). Цей параметр встановлює базу в.о. для інших змінних моделі обмежувача. Тому моделі обмежувачів для машин різних розмірів і типів можуть мати схожі параметри. Слід особливо наголосити, що база в.о. в 1.0, яка використовується в моделі OEL, ґрунтується на номінальному рівні збудження машини, а не на лінійній частині характеристики неробочого ходу, як в моделі генератора.

Наступний етап – вибір параметрів граничних характеристик. Спрацювання у визначений час,  $I_{TFPU}$  (рівень спрацювання часового обмежувача струму збудження OEL), зазвичай знаходиться біля позначки в 1,05 в.о. номінального значення. Миттєве граничне значення,  $I_{INST}$ , зазвичай, близько 1,5 в.о.

У деяких системах, гістерезис між спрацюванням і відпусканням (реле) входить у модель, так що значення  $I_{FDLIM}$  (поріг струму збудження часового OEL) може бути встановлено на тому ж рівні, що й  $I_{TFPU}$ . У деяких системах, значення  $I_{FDLIM}$  повинно бути встановлено на кілька відсотків вище, щоб уникнути граничного циклу.

Цифрові системи визначають характеристики обмежувача з обернено-залежною затримкою часу за допомогою рівняння зі змінними параметрами, і можуть дотримуватися стандартних визначень кривої, таких як в рівнянні (1) або тих, що наведені в [15]. Тим не менш, характеристики зворотно-залежної затримки часу старих систем залежать від конструкції і можуть мати різну форму. Більшість типів систем можна адекватно моделювати підбором кривої за допомогою характеристичного рівняння (1), де А, В і С – константи [15].

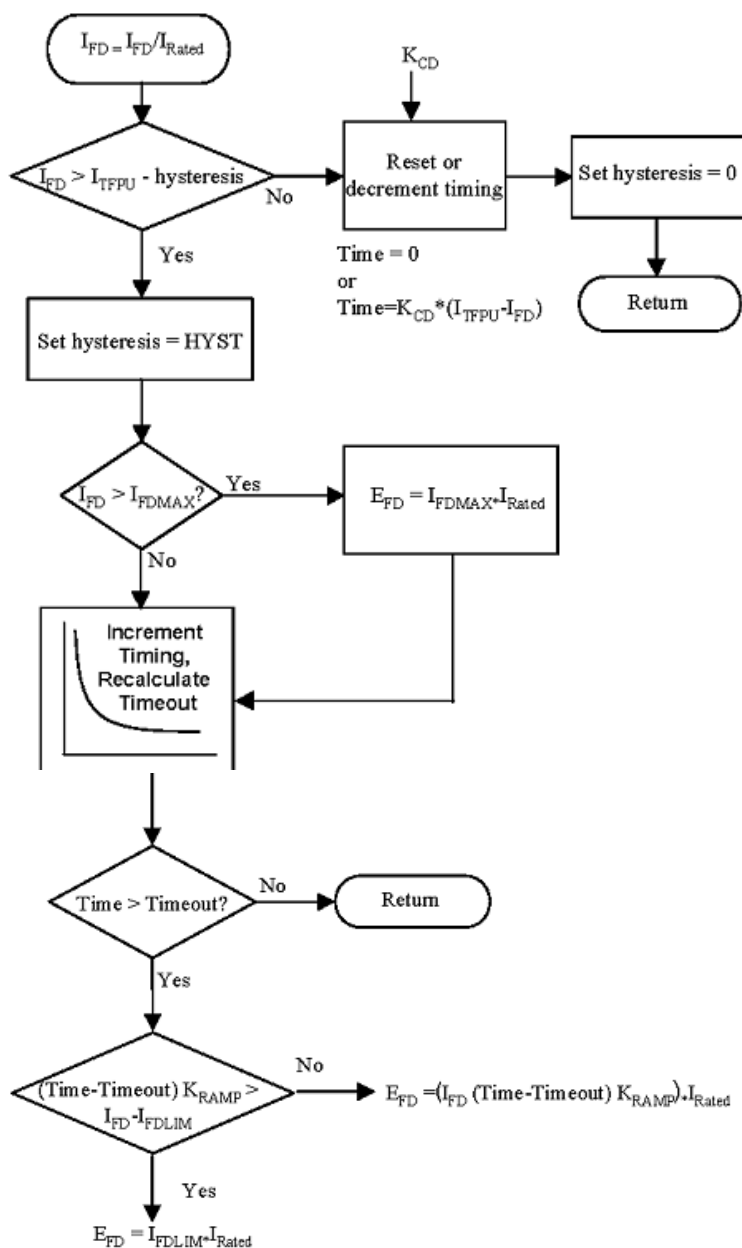


Рис. 3. Обмежувач перезбудження з можливістю задання уставок спрацюванням та граничних характеристик

Рівень  $I_{FD}$  порівнюється з рівнем спрацювання  $I_{TFPU}$ , і якщо  $I_{FD}$  нижчий від рівня спрацювання, то OEL буде неактивним. У цьому випадку слід переставити таймер або зменшити величину до

необхідного рівня. Деякі OELs автоматично переставляють часовий механізм після випадку обмежувача з синхронізму, тобто, якщо рівень  $I_{FD}$  менший, ніж рівень  $I_{TFPU}$ . Інші конструкції повільно переставляють таймер на нуль, для (врахування) охолодження обмотки збудження. Якщо обмежувач спрацює до завершення перестановки таймера, OEL працюватиме швидше. У моделі швидкість охолодження пропорційна до різниці між  $I_{TFPU}$  і  $I_{FD}$  та насиченню, встановленому  $K_{CD}$  (насичення охолодження OEL).

Складніші конструкції містять функцію гістерезису, яка не дозволить обмежувачу випадати поки рівень збудження не впаде нижче від певної величини, меншої, ніж рівень спрацювання (реле). Це допомагає запобігти граничному циклу. Гістерезис слід ініціалізувати з нуля і встановлювати лише на постійну величину  $HYST$  (гістерезис спрацювання/відпускання OEL) після спрацювання обмежувача.

Після виходу обмежувача з синхронізму таймер слід переставити на нуль. Граничний режим, такий, як перехід на ручне управління, можна досягнути установкою  $HYST$  на доволі велике значення, наприклад,  $I_{TFPU}$ .

Якщо представлено миттєвий максимальний поріг або максимальний рівень, то використовується параметр  $I_{FDMAX}$ . Рівень  $I_{FD}$  потім прив'язується до максимального значення  $I_{FDMAX}$ .

У той час як рівень  $I_{FD}$  залишається вищим  $I_{TFPU}$ , час обмежувача збільшується відповідно до необхідної часової характеристики (характеристики режиму синхронізації). Обмежувач з встановленим часом повинен просто збільшувати час незалежно від рівня перезбудження. У застосунках зі зворотно-залежною витримкою часу, часовий режим перезбудження повинен вводитись відповідно до необхідного відношення (1), щоб врахувати зміни рівня перезбудження, у той час як обмежувач відраховує час. Коли час на обмежувачі досягає позначки тайм-аут, рівень  $I_{FD}$  зменшується до значення  $I_{FDLIM}$ . Більшість обмежувачів роблять це швидко, за один крок, проте, деякі обмежувачі знижують збудження поступово. Швидкість поступового зниження задається параметром  $K_{RAMP}$  (швидкість поступового зниження порогу OEL). Результатом зниження струму збудження за один крок буде достатньо велике значення  $K_{RAMP}$ . Значення  $I_{FD}$  повинне залишатись на рівні граничного значення, поки умови системи не дадуть значення  $I_{FD}$ , яке нижче від рівня спрацювання реле,  $I_{TFPU}$  мінус гістерезис,  $HYST$ . З іншого боку, оскільки система в.о. рівня збудження для моделі OEL інша, ніж для моделей генератора і системи збудження, значення  $I_{FDLIM}$  слід перевести в відповідний рівень  $E_{FD}$  в моделі генератора, помноживши на  $I_{Rated}$  (номінальний струм збудження). Здебільшого доречно насичення обмежувача, як це показано на рис. 3, за допомогою тривалого збільшення часу для високого струму збудження.

Ця модель не містить необхідних функцій контролю стійкості справжніх OELs. Отже, вона не призначена для взаємодії з будь-якими моделями системи збудження, які входять у цей документ. Передбачається, що напруга збудження синхронної машини,  $E_{FD}$  (вихідна напруга збуджувача), змінюється прямо через вибір вихідних даних моделі системи збудження з вихідним сигналом цієї моделі OEL, так ніби є логічний елемент з низьким значенням на виході моделі системи збудження. Вихідний сигнал цієї моделі OEL, загалом, не є еквівалентним сигналу  $V_{OEL}$  (вихідна напруга обмежувача перезбудження), який трапляється в інших частинах цього документа. Вихідний сигнал не повинен вводити жодної внутрішньої точки в модель системи збудження, оскільки тоді будуть потрібні додаткові компенсації сигналу та детальні налаштування, щоб відповідати фактичній відповіді обладнання. Ці деталі були навмисно опущені в цій моделі. Якщо необхідно представити динамічний сигнал  $V_{OEL}$ , який впливає на стійкість системи управління збудженням, слід використовувати детальніші моделі OEL [16].

Оскільки дія цієї моделі обмежувача перевершуватиме вихід моделі системи збудження, якщо умови напруги змодельованої системи поліпшаться протягом встановленого OEL обмеження настільки, що OEL може вийти з-під контролю, повинна бути додаткова часова затримка до відновлення контролю моделлю системи збудження через її насичення.

#### **Тестування математичної моделі обмежувача максимального збудження**

Перевіримо роботу блока обмеження максимального збудження для генератора ТГ-4 РАЕС з новою системою збудження SEMI Exciter (AEG).

Згідно з наданою спеціалістами AEG інформацією (таблиця) для нової системи збудження прийнято такий характер обмеження максимального струму збудження: протягом 10 с допускається

двократний номінальний струм збудження, після чого струм збудження понижується до 150 % номінального.

### Параметри обмежувача максимального збудження системи збудження SEMI Exciter (AEG)

|               |                              |              |   |
|---------------|------------------------------|--------------|---|
| $I_{FD, max}$ | Максимальний струм збудження | 4.000A, 10с; | 10...200 % $I_{ном}$ , А,<br>0,006...200s |
|               |                              | 3.000A       | 10...150 % $I_{ном}$ , А                  |

Проведемо розрахункову перевірку відпрацювання роботи обмежувача максимального збудження. Для цього змодельуємо перехідний процес, пов'язаний зі зростанням уставки регулятора збудження (в  $t=1$  с) і подальшим відновленням уставки АРЗ до вихідного стану ( $t=20$  с). На рис. 4 зображено часові залежності напруги на шинах генератора ТГ-4, напруги збудження, струму збудження (в.о.) та струму генератора.

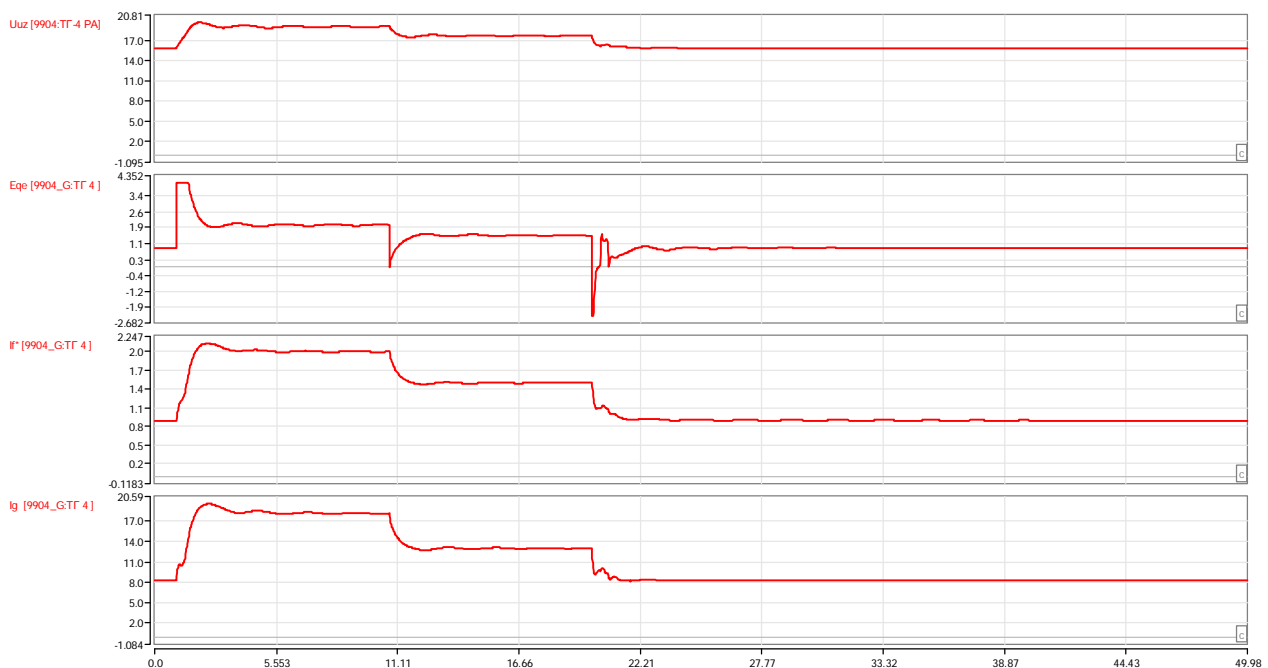


Рис. 4. Часові залежності напруги на шинах генератора ТГ-4, напруги збудження, струму збудження (в.о.) та струму генератора

Як видно з рис. 4 у час  $t=1$  с збільшуємо уставку по напрузі генератора. Згідно з цим збуренням АРЗ збільшує струм збудження, величина якого обмежується на рівні двократного номінального струму збудження (4000 А). Це обмеження триває не більше ніж 10 с (згідно з заданою характеристикою). Після цього переходимо до режиму з довготривалим перевантаженням на рівні 150 % номінального струму збудження (3000 А). У час  $t=20$  с відновлюємо номінальну напругу генератора, відповідно до цього струм збудження знижується до початкового доаварійного значення. Проведений експеримент підтвердив правильність роботи обмежувача максимального збудження.

### Висновки

1. Розроблено імітаційну модель та реалізовано цифрову модель обмежувача максимального збудження синхронних машин ОЕЛ, що вперше в Україні дало змогу детально аналізувати стійкість роботи електричних станцій та електроенергетичну систему загалом.

2. На прикладі реальної характеристики обмежувача максимального збудження генераторів Рівненської АЕС перевірено роботу блока OEL в післяаварійних режимах, пов'язаних з небезпечним зниженням рівнів напруг у мережі.

1. Byerly R. T., Kimbark E. W., Ed. *Stability of Large Electric Power Systems*. New York: IEEE Press, 1974. 2. IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power Systems Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, pp. 494–509, February 1981. 3. План реконструкції і модернізації теплоелектростанцій і теплоелектроцентралей в період до 2020 року. – Розпорядження Кабінету Міністрів України. – № 648-р від 8.09.04р. 4. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012. Київ.: Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – 2012. – 29 с. 5. Типове технічне завдання на проектування реконструкції (технічного переоснащення) енергоблоків ТЕС, АЕС, ГАЕС, ГЕС та ТЕЦ, що працюють в ОЕС України. – 7.05.2014 р. 6. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. IEEE Std 421.5™-2005. 7. [www.dakar.eleks.com](http://www.dakar.eleks.com) 8. Скрипник О. І. ДАКАР – комплекс програм для дослідження режимів роботи інтелектуальних енергетичних систем / О. І. Скрипник, В. С. Коновал, А. Б. Козовий, Т. О. Товстяк // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. – Київ. – 2011. – С. 56-64. 9. Konoval V. Power system dynamic stability: impact analysis of synchronous generator excitation system replacement / Volodymyr Konoval, Andriy Kozovyy, Oleksiy Skrypnyk, Andriy Kuchynskyi, Petro Dembitskyi // *Blackout a krajowy system elektroenergetyczny* (2014). – Poznan. – 2014. – P. 349-359. 10. ANSI C50.13-1989, American National Standard Cylindrical-Rotor Synchronous Machines. 11. IEEE Std C37.102-1995, IEEE Guide for AC Generator Protection. 12. Kundur, P., *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 13. Morison, G. K., Gao, B., and Kundur P., "Voltage Stability Analysis Using Static and Dynamic Approaches," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, no. 3, pp. 1159–1171, August 1993. 14. IEEE Std 1110-2002, IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Applications in Power System Stability Analyses. 15. IEEE Std C37.112-1996, IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays. 16. IEEE Task Force on Excitation Limiters, "Recommended Models for Over Excitation Limiting Devices", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 10, no. 4, pp. 706–713, December 1995.